

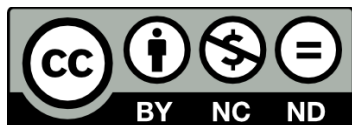


# ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ III

## ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑ ΣΗΕ

Λαμπρίδης Δημήτρης  
Κατσανού Βάνα

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



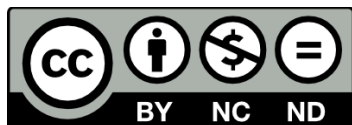
# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





# Μάθημα ασκήσεων 7



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Εκφώνηση (1/2)

1. Μία στροβιλογεννήτρια  $G$  που κινείται από ατμοστρόβιλο, συνδέεται μέσω τριφασικού μετασχηματιστή  $T$  και γραμμής  $L$  με άπειρο ζυγό. Η γεννήτρια τροφοδοτεί το ζυγό με  $p = 0,6 pu$  και  $q = 0,4 pu$ , δηλαδή δίνει άεργη ισχύ στο ζυγό.

α) Υποθέστε ότι η ισχύς του στροβίλου αυξάνει απότομα κατά  $\Delta P$ . Ποια είναι η μέγιστη τιμή του  $\Delta P$  έτσι ώστε να μη χαθεί ο συγχρονισμός; (Η Η.Ε.Δ. να θεωρηθεί σταθερή).

β) Ενώ η μηχανή εργάζεται στις παραπάνω συνθήκες λειτουργίας  $p = 0.6 pu$  και  $q = 0.4 pu$ , συμβαίνει σφάλμα στο ζυγό για ένα χρονικό διάστημα έτσι ώστε η γωνία φόρτισης  $\delta$  να αυξηθεί κατά  $\Delta\delta$ . Κατόπιν το σφάλμα εξαφανίζεται και αποκαθίσταται η ομαλή λειτουργία. Να βρεθεί η μέγιστη αύξηση της γωνίας  $\Delta\delta$  έτσι ώστε να μη χαθεί ο συγχρονισμός, αν η μηχανική ισχύς του στροβίλου είναι σταθερή.



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Εκφώνηση (2/2)

Δίνονται:  $S_b = 300 \text{ MVA}$  ισχύς βάσης

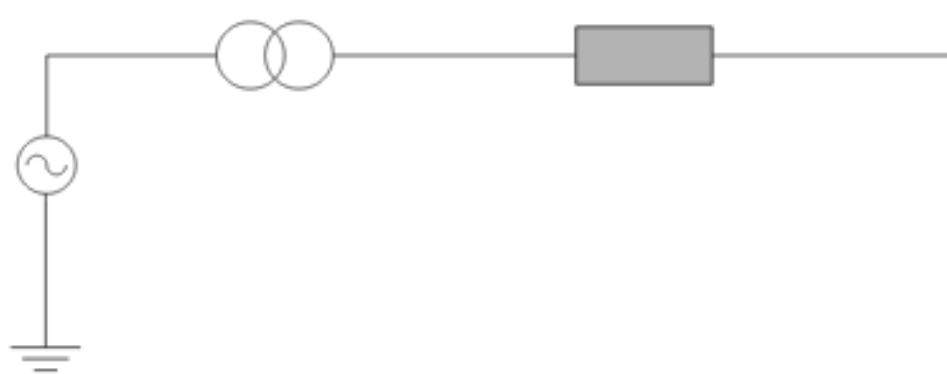
Γεννήτρια	G:	$S = 300 \text{ MVA}$	$V = 20 \text{ kV}$	$x = 1,0 \text{ pu}$
Μετασχηματιστής	T:	$S = 300 \text{ MVA}$	$V = 20/150 \text{ kV}$	$x = 0,1 \text{ pu}$
Γραμμή μεταφοράς	L:	$l = 30 \text{ km}$	$L' = 1 \text{ mH/km}$	$R', C'$ αμελητέα
Άπειρος ζυγός		$U = 150 \text{ kV}$ και	$f = 50 \text{ Hz}$	



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (1/7)

α) Το σχήμα που περιγράφει το σύστημα της εκφώνησης θα είναι το:



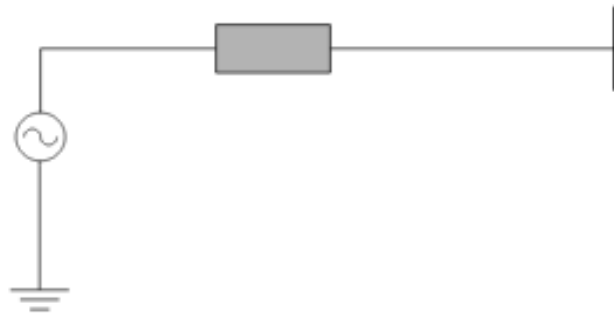
Σχήμα 1.1



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (2/7)

Το ισοδύναμο σε pu κύκλωμα εμφανίζεται αντίστοιχα στο σχήμα 1.2:



Σχήμα 1.2

όπου:

$$x = x_G + x_T + x_L = x_G + x_T + l \cdot L' \cdot \omega \cdot \frac{S_b}{V_b^2} = 1,226 \text{ pu} \quad (1.1)$$

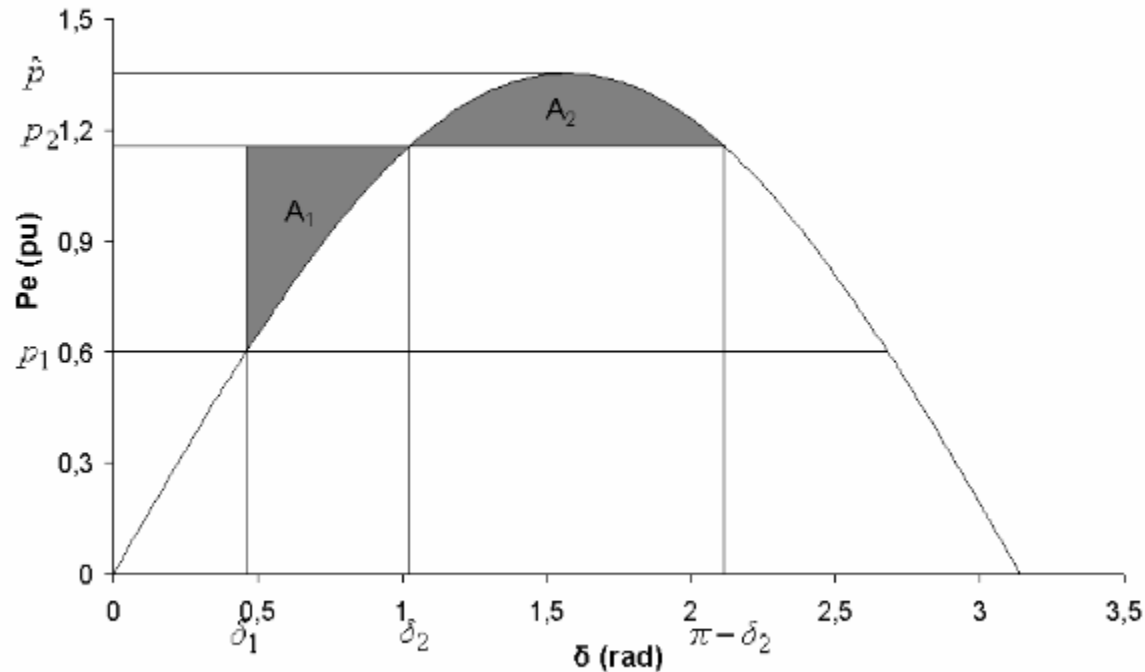




# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (3/7)

Επίσης, η καμπύλη μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της γωνίας φόρτισης θα είναι η:



Σχήμα 1.3



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (4/7)

Για τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η  $\Delta p$  έτσι ώστε να μη χαθεί ο συγχρονισμός έχουμε από το βιβλίο θεωρίας (σχ. 4.91 σελ. 171):

$$\Delta p = \hat{p}(\sin \delta_2 - \sin \delta_1) \quad (1.2)$$

Για το όριο ισχύος στη στάσιμη κατάσταση θα έχουμε:

$$\hat{p} = \frac{e \cdot v}{x} \quad (1.3)$$

Για την τάση εξόδου της γεννήτριας και την αρχική γωνία λειτουργίας της  $\delta_1$  έχουμε όμως από τις σχέσεις της ενεργής και άεργης ισχύος που αυτή προσφέρει στο δίκτυο:

$$p = \frac{e \cdot v}{x} \sin \delta_1 \Rightarrow e = \frac{p \cdot x}{v \cdot \sin \delta_1} \quad (1.4)$$

και

$$q = \frac{e \cdot v}{x} \cos \delta_1 - \frac{v^2}{x} \Rightarrow e = \frac{q \cdot x + v^2}{v \cdot \cos \delta_1} \quad (1.5)$$



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (5/7)

Διαιρώντας τις σχέσεις (1.4) και (1.5) κατά μέλη θα πάρουμε:

$$1 = \frac{p \cdot x \cdot \cos \delta_1}{(q \cdot x + v^2) \sin \delta_1} \Rightarrow \tan \delta_1 = \frac{p \cdot x}{q \cdot x + v^2} \Rightarrow \delta_1 = 26,27^\circ \quad (1.6)$$

και εισάγοντας την τιμή αυτή στη σχέση (1.4) θα έχουμε επίσης:

$$e = 1,66 \text{ pu} \quad (1.7)$$

Από τη σχέση (1.2) μας λείπει ακόμα η γωνία  $\delta_2$ . Για να την υπολογίσουμε θα χρησιμοποιήσουμε το κριτήριο των ίσων εμβαδών, όπως αυτό δίνεται στη σχέση 4.90, σελ. 171 του βιβλίου θεωρίας, από όπου θα προκύψει τελικά:

$$\delta_2 = 58,79^\circ \quad (1.8)$$

Άρα τελικά θα είναι (σχέση (1.2)):

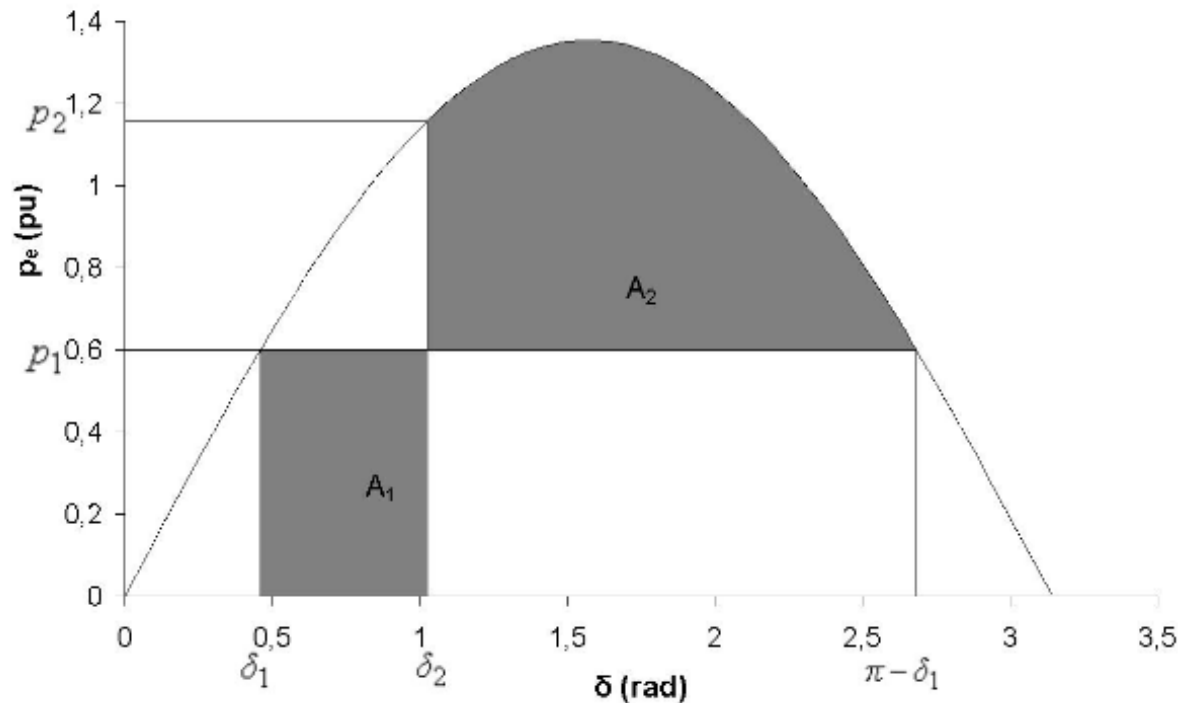
$$\Delta p = 0,559 \text{ pu} \quad \text{ή} \quad \Delta P = 167,7 \text{ MW}$$



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (6/7)

β) Σφάλμα στο ζυγό σημαίνει ότι μηδενίζεται η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας  $p_e$ . Το νέο διάγραμμα ισχύος θα έχει ως εξής:



Σχήμα 1.2



# Άσκηση 1<sup>η</sup>

## Επίλυση (7/7)

Από το κριτήριο ίσων εμβαδών θα έχουμε:

$$A_1 = A_2 \Rightarrow \int_{\delta_1}^{\delta_2} p_1 d\delta = \int_{\delta_2}^{\delta_3} (\hat{p} \cdot \sin \delta - p_1) d\delta \Rightarrow$$

$$p_1 \Delta\delta = \hat{p} \cos(\delta_1 + \Delta\delta) + \hat{p} \cos \delta_1 - p_1 (\pi - 2\delta_1) + p_1 \Delta\delta \Rightarrow$$

$$\cos(\delta_1 + \Delta\delta) + \cos \delta_1 - \sin \delta_1 (\pi - 2\delta_1) = 0 \quad (1.9)$$

από όπου θα προκύψει τελικά:

$$\Delta\delta = 58,76^\circ$$



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

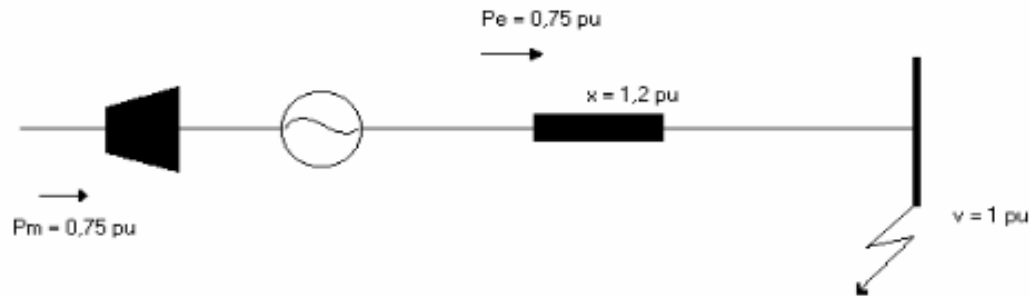
## Εκφώνηση (1/2)

2. Δίνεται στροβιλογεννήτρια που τροφοδοτεί άπειρο ζυγό όπως δείχνει το σχήμα. Γίνεται σφάλμα στο ζυγό τη χρονική στιγμή  $t=0$  που εκκαθαρίζεται μόνο του και η γεννήτρια συνδέεται πάλι κανονικά τη χρονική στιγμή  $t=0,1$  s. Μεταξύ  $t=0$  και  $t=0,1$  s η ηλεκτρική ισχύς είναι μηδέν. Ζητούνται α) το πλάτος ταλάντωσης της γωνίας  $\delta$  και β) η συχνότητα ταλάντωσης της ισχύος, αν αμεληθούν οι τριβές και η απόσβεση.



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Εκφώνηση (2/2)



**Δίνονται:**

$$S_N = 200 \text{ MVA}$$

$$U_N = 20 \text{ kV}$$

$$p = 1 \text{ ζεύγος}$$

$$E = 30 \text{ kV}$$

$$H = 10 \text{ s}$$

$$X = 1,2 \text{ pu}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P_m = 150 \text{ MW}$$



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (1/9)

Το μόνο δεδομένο που έχουμε για το σφάλμα είναι το χρονικό διάστημα της διάρκειάς του. Αφού λοιπόν υπολογίσουμε τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση κίνησης του δρομέα της μηχανής, η οποία θα μας δώσει τη μεταβολή της γωνίας λειτουργίας με τον χρόνο, οπότε και τη γωνία λειτουργίας της μηχανής τη χρονική στιγμή όπου θα εξαλειφθεί το σφάλμα.

Για το όριο ευστάθειας στάσιμης κατάστασης γνωρίζουμε ότι:

$$\hat{p} = \frac{e \cdot v}{x} = 1,25 \text{ pu} \quad (2.1)$$

και για την κατάσταση λειτουργίας πριν το σφάλμα θα είναι:

$$p_1 = \hat{p} \sin \delta_1 \Rightarrow \delta_1 = \sin^{-1} \frac{p_1}{\hat{p}} = 36,87^\circ = 0,644 \text{ rad} \quad (2.2)$$





# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (2/9)

ενώ η εξίσωση κίνησης του δρομέα της μηχανής είναι η:

$$p_a = \frac{2H}{\omega} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \Rightarrow \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{p_a \cdot \omega}{2H} \quad (2.3)$$

με αρχικές συνθήκες τις  $\delta(0) = \delta_1$  και  $\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=0} = 0$  (αφού πριν το σφάλμα η γεννήτρια

λειτουργούσε σε στάσιμη κατάσταση).

Η λύση της (2.2) είναι η:

$$\delta(t) = \frac{p_a \cdot \omega}{4H} t^2 + c_1 t + c_2 \quad (2.4)$$

ενώ από τις αρχικές συνθήκες προκύπτουν:

$$c_1 = 0 \text{ και } c_2 = \delta_1$$



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (3/9)

και για την ισχύ επιτάχυνσης  $p_a$  είναι:

$$p_a = p_m - p_e = p_m = 0,75 \text{ pu} \quad (2.5)$$

αφού η ηλεκτρική ισχύς  $p_e$  κατά τη διάρκεια του σφάλματος (και της επιτάχυνσης της μηχανής) είναι ίση με μηδέν.

Τελικά η γενική λύση της (2.2) θα είναι η:

$$\delta(t) = \frac{p_a \cdot \omega}{4H} t^2 + \delta_1 \quad (2.6)$$

και για  $t = 0,1 \text{ s}$  θα είναι:

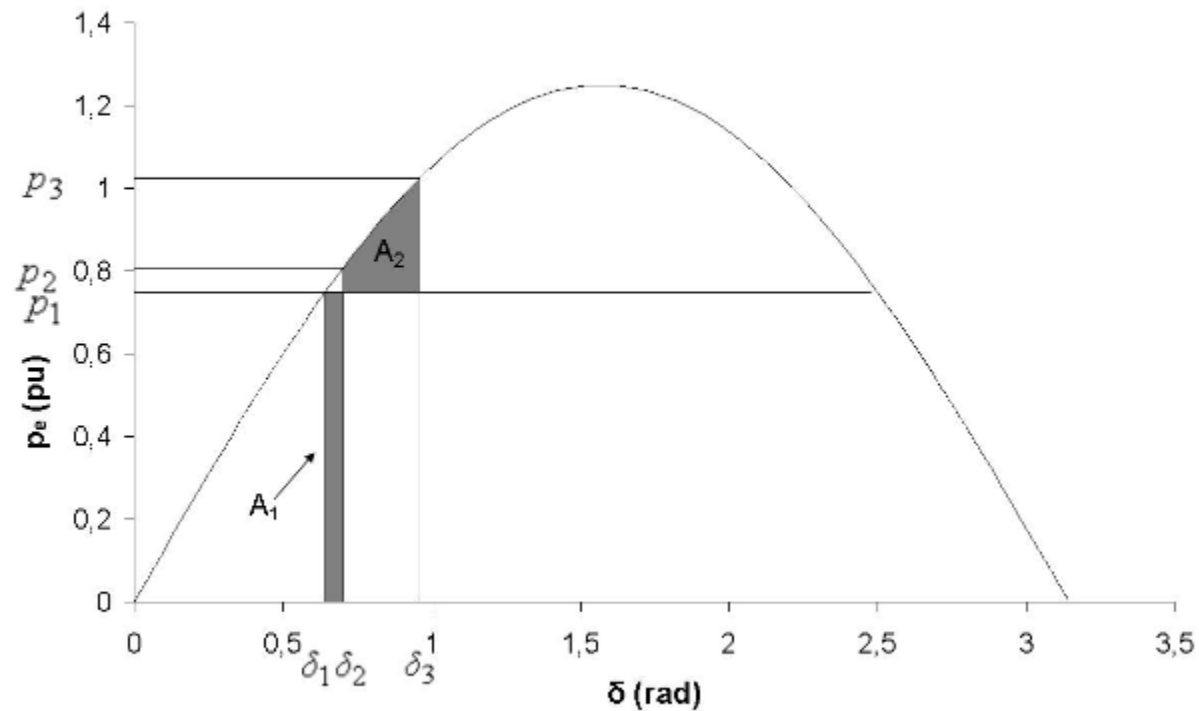
$$\delta_2 = \delta(0,1) = 0,703 \text{ rad} = 40,27^\circ \quad (2.7)$$



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (4/9)

Στο Σχήμα (2.1) εμφανίζεται η καμπύλη της μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος της γεννήτριας συναρτήσει της γωνίας λειτουργίας.



Σχήμα 2.1



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (5/9)

Στο χρονικό διάστημα από  $t = 0$  μέχρι  $t = 0,1 \text{ s}$  η μηχανή θα επιταχύνεται, και το αντίστοιχο εμβαδόν επιτάχυνσης θα είναι το:

$$A_1 = p_1(\delta_2 - \delta_1) = 0,0443 \quad (2.8)$$

Τη χρονική στιγμή  $t = 0,1 \text{ s}$  η μηχανή έχει  $\omega > \omega_s$  και η γωνία  $\delta$  συνεχίζει να αυξάνει, ενώ τώρα ισχύει  $p_e > p_m$  και ο δρομέας επιβραδύνει. Το εμβαδόν επιβράδυνσης είναι το:

$$A_2 = \int_{\delta_2}^{\delta_3} (\hat{p} \cdot \sin \delta - p_m) d\delta = \hat{p}(\cos \delta_2 - \cos \delta_3) - p_m(\delta_3 - \delta_2) \Rightarrow$$

$$A_2 = 1,481 - 1,25 \cos \delta_3 - 0,75\delta_3 \quad (2.9)$$



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (6/9)

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο των ίσων εμβαδών θα έχουμε:

$$A_1 = A_2 \Rightarrow 0,0443 = 1,481 - 1,25 \cos \delta_3 - 0,75 \delta_3 \Rightarrow$$

$$1,25 \cos \delta_3 + 0,75 \delta_3 - 1,4368 = 0 \quad (2.10)$$

από όπου θα προκύψει:

$$\delta_3 = 0,960 \text{ rad} = 55,00^\circ \quad (2.11)$$

Αυτό είναι και το πάνω όριο της ταλάντωσης που θα κάνει η γωνία λόγω του σφάλματος.

Σε αυτό το σημείο είναι  $p_e > p_m$  και η μηχανή συνεχίζει να επιβραδύνει, η κυκλική συχνότητα  $\omega$  είναι μικρότερη της σύγχρονης και η γωνία  $\delta$  μειώνεται μέχρι τη γωνία  $\delta_4$ , όπου είναι πάλι  $\omega = \omega_s$ . Η μηχανή θα συνεχίσει να ταλαντώνεται μεταξύ των γωνιών  $\delta_4$  και  $\delta_3$  μέχρι να καταλήξει, λόγω αποσβέσεων, στο αρχικό σημείο λειτουργίας ( $p = p_1 = p_m$ ,  $\delta = \delta_1$ ).

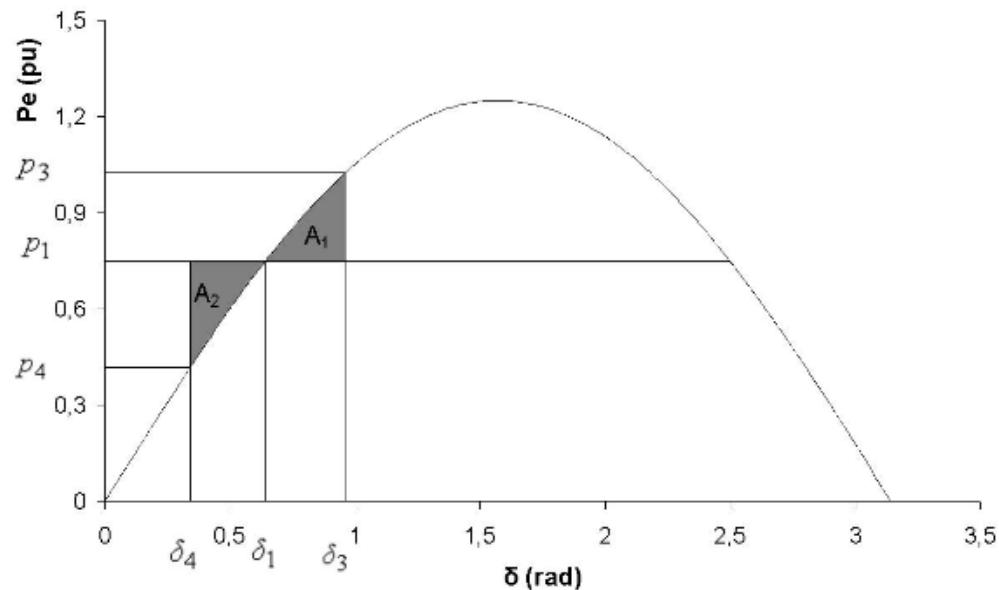


# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (7/9)

**Παρατήρηση:** Για να υπολογίσουμε τη γωνία  $\delta_4$  δεν μπορούμε προφανώς να χρησιμοποιήσουμε την καμπύλη ισχύος του Σχήματος 2.1, επειδή αυτό ισχύει για τη χρονική διάρκεια του σφάλματος. Η ταλάντωση του δρομέα γίνεται τώρα υπό πλήρες ηλεκτρικό φορτίο.

Για να υπολογίσουμε τη γωνία  $\delta_4$  θα χρησιμοποιήσουμε λοιπόν το σχήμα:



Σχήμα 2.2

# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (8/9)

Ισχύει πάλι το κριτήριο των ίσων εμβαδών, οπότε θα έχουμε:

$$A_1 = A_2 \Rightarrow \cos \delta_4 - \cos \delta_3 = (\delta_3 - \delta_4) \sin \delta_1 \quad (2.12)$$

από όπου θα προκύψει τελικά:

$$\delta_4 = 0,353 \text{ rad} = 20,23^\circ \quad (2.13)$$

Άρα το πλάτος της ταλάντωσης θα είναι:

$$\Delta\delta = 55^\circ - 20,23^\circ = 34,77^\circ$$



# Άσκηση 2<sup>η</sup>

## Επίλυση (9/9)

Η ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης σε περίπτωση μηδενικής απόσβεσης είναι:

$$\omega_{\delta} = \sqrt{\frac{p_s \cdot \omega}{2H}} \quad (2.12)$$

όπου:

$$p_s = \left. \frac{\partial p_e}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_1} = \hat{p} \cos \delta_1 = 1 \text{ pu} \quad (2.13)$$

Άρα τελικά θα είναι:

$$\omega_{\delta} = 3,963 \text{ rad / sec} \quad (2.14)$$

και η συχνότητα της ταλάντωσης της ισχύος θα είναι:

$$f_{\delta} = \frac{\omega_{\delta}}{2\pi} = 0,63 \text{ Hz}$$





# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λαμπρίδης Δημήτρης, Κατσανού Βάνα. «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙΙ, Μάθημα ασκήσεων 7». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015 Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](http://opencourses.auth.gr/eclass_courses).



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

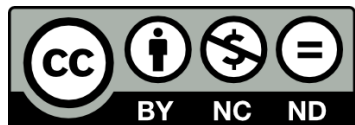
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





# Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα  
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2014-2015





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

---

# Σημειώματα

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

